듀얼 디퓨저 리소그래피를 이용한 3 차원 마이크로 구조의 제작

한동호 · Hassan Hafeez* · 류현열 · 조시형 · 박진구*[†]

한양대학교 바이오나노학과, *한양대학교 금속재료공학과

Fabrication of 3D Micro Structure by Dual Diffuser Lithography

Dong-Ho Han, Hassan Hafeez*, Heon-Yul Ryu, Si-Hyeong Cho and Jin-Goo Park*[†]

Department of Bionano Technology, Hanyang University

*Department of Metallurgy & Materials Engineering, Hanyang University

(2013년 6월 15일 접수 : 2013년 8월 14일 최종수정 : 2013년 8월 14일 채택)

Abstract Recently, products that have 3-dimensional(3D) micro structure have been in wide use. To fabricate these 3D micro structures, several methods, such as stereo lithography, reflow process, and diffuser lithography, have been used. However, these methods are either very complicated, have limitations in terms of patterns dimensions or need expensive components. To overcome these limitations, we fabricated various 3D micro structures in one step using a pair of diffusers that diffract the incident beam of UV light at wide angles. In the experiment, we used positive photoresist to coat the Si substrate. A pair of diffusers(ground glass diffuser, opal glass diffuser) with Gaussian and Lambertian scattering was placed above the photomask in the passage of UV light in the photolithography equipment. The incident rays of UV light diffracted twice at wider angles while passing through the diffusers. After exposure, the photoresist was developed fabricating the desired 3D micro structure. These micro structures were analyzed using FE-SEM and 3D-profiler data. As a result, this dual diffuser lithography(DDL) technique enabled us to fabricate various microstructures with different dimensions by just changing the combination of diffusers, making this technology an efficient alternative to other complex techniques.

Key words 3D micro structure, dual diffuser, diffuser lithography, ground glass diffuser, opal glass diffuser.

1. 서 론

포토리소그래피(photolithography) 공정은 반도체 공정이나 MEMS(micro electro mechanical system) 공정에서 전체 공정의 30 % 이상을 차지할 정도로 중요한 부분을 차지하고 있다. 일반적인 포토리소그래피 공정에서는 평탄한 평면 위에서 2차원 형상을 얼마나 조밀하고 정확하게 구현할 수 있는가에 관심이 있었다. 그렇기 때문에 도포된 감광제(photoresist)의 두께는 얇을수록, 패턴이 형성된 감광제 구조물의 측면은 수직에 가까울수록 바람직했지만, 근래 들어 다양한 산업분야에서는 포토리소그래피 공정을 이용하여 단순히 2차원 구조를 구현하는 것에서 더 나아가, 부드럽고 굴곡진 3차원 형태

의 미세 구조를 직접적으로 형성하는 기술에 대한 요구가 늘어가고 있는 추세이다.^{1,2)} 이러한 3차원 미세구조는 마이크로렌즈나^{3,4)} 마이크로유체칩⁵⁾ 또는 전주도금을 통한 금속 몰드를 제작하기 위한 마더몰드⁶⁾와 같은 다양한 용도로 사용될 수 있다.

3차원 미세구조를 형성하기 위한 기술로는 스테레오리소그래피(stereo lithography),⁷⁾ 리플로우(thermal reflow) 공정,^{8,9)} 다중노광단일현상(multi-exposure and single-develop: MESD) 기술,¹⁰⁾ 디퓨저 리소그래피(diffuser lithography) 공정,^{11,12)} 등이 있다. 스테레오리소그래피는 CAD program을 이용하여 3차원 구조의 정보를 입력시키고 UV beam을 조사하여 3차원 구조를 제작하는 방법으로서 다양한 3차원 미세 구조를 형성할 수 있지만,

[†]Corresponding author

E-Mail : jgpark@hanyang.ac.kr (J. G. Park, Hanyang Univ.)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이 공정을 위해 특별한 장치가 필요하여 공정이 복잡하고, 사용되는 포토마스크(photomask)가 매우 고가라는 단점이 있다. 리플로우 공정은 기존의 포토리소그래피 공정에서 현상 공정까지 진행 후, 감광층을 용융시켜 3차원 구조를 형성하는 방식으로서, 구현할 수 있는 구조와 사용할 수 있는 감광제의 종류가 한정적이라는 단점이 있다. MESD 기술은 복수의 노광 공정을 진행한 뒤 한번의 현상 공정을 통하여 다층 구조를 형성하는 방법으로, 부드럽고 굴곡진 3차원 구조를 표현하기에는 어려운 부분이 있다. 이에 반하여 디퓨저 리소그래피 공정은 디퓨저 유리를 통과하면서 생기는 빛의 산란을 리소그래피에 응용한 방법으로 매우 간단히 이용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만 다른 리소그래피 공정에 비해 두꺼운 두께(약 60~80 μm)의 감광층을 필요로 하고, 디퓨저가 산란시키는 빛의 각도가 고정되어 있기 때문에 다양한 모양과 크기의 구조를 구현하기 어렵다는 단점을 가지고 있다.¹¹⁾ 또한, 다양한 싱글 디퓨저를 사용하여 제작한 3차원 미세구조에 관한 연구는 최근 다수 보고되고 있으나,¹¹⁻¹⁴⁾ 두 장 이상의 디퓨저를 리소그래피 공정에 응용한 연구는 극히 미비하다.

본 연구에서는 위에 언급된 싱글 디퓨저 리소그래피의 단점을 개선하고자 듀얼 디퓨저 리소그래피(dual diffuser lithography: DDL)라는 개념을 제안하고, 측정된 결과를 기반으로 이 공정에 대한 기본 특성에 대하여 알아보고자 하였다. 앞서 기술한 한 장의 디퓨저를 사용할 때 야기되는 한정된 산란 각도로 인한 3차원 미세구조 제작의 한계성을 개선하기 위해, 각기 다른 산란 방식(Gaussian and Lambertian scattering)을 갖는 두 장의 디퓨저(Ground glass, Opal glass diffuser)를 조합함으로써 빛이 산란되는 정도를 인위적으로 조절하였다. FE-SEM(S-4800, Hitachi,

Japan), 3D-profiler($\mu\text{m-surf}$, Nanofocus, Germany) 등의 측정 기기를 이용하여 분석한 결과, 듀얼 디퓨저 리소그래피 공정을 통해 다양한 경사와 굴곡을 갖는 3차원 미세 구조가 제작되는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 제안된 개념과 도출된 결과는 차후 두 장 이상의 디퓨저를 사용한 3차원 리소그래피 연구 및 응용분야에 유용하게 활용될 것으로 예상된다.

2. 실험 방법

듀얼 디퓨저 리소그래피 공정에 사용된 디퓨저로는 Ground glass 120(NT45-656, Edmund Optics, USA) 디퓨저와, Ground glass 220(NT45-656, Edmund Optics, USA) 디퓨저, 그리고 Opal glass(NT43-719, Edmund Optics, USA) 디퓨저를 이용하였다. Ground glass 디퓨저는 입사된 빛이 가우시안 분포(Gaussian distribution)로 산란되는 특징을 가지며,¹⁵⁾ Opal glass 디퓨저는 입사된 빛이 Lambert의 코사인(cosine) 법칙을 따라 램버시안 분포(Lambertian distribution)로 산란되는 특징을 갖는다.¹⁶⁾ Ground glass 120과 Ground glass 220의 뒤에 표기되어 있는 숫자는 Ground glass 디퓨저 제작시 사용된 연마제(grit)의 정보로서, 숫자의 역수가 사용된 연마 입자의 크기를 의미한다. 따라서, 더 큰 입자로 가공된 Ground glass 120 디퓨저가 Ground glass 220 디퓨저에 비해 더 거친 표면을 가진다. 이와 같은 사실은 3D-profiler를 이용하여 측정된 결과에서 확인할 수 있다. Fig. 1(a) 에서와 같이 Ground glass 120 디퓨저는 10.57 μm 의 표면조도(roughness)를 보이는 반면, Ground Glass 220 디퓨저(Fig. 1(b))는 좀 더 낮은 4.96 μm 의 표면조도를 보였고, Opal glass 디퓨저(Fig. 1(c))는 0.27 μm 의

Fig. 1. Optical Microscope images (top), 3D profiler images and roughness values (bottom) : (a) Ground glass 120 diffuser, (b) Ground glass 220 diffuser, (c) Opal glass diffuser.

Fig. 2. Photomask design : (a) line patterns, length = 120 μm , width = 20 μm , gap = 20 μm , (b) circular patterns, diameter = 30 μm , gap = 20 μm .

Fig. 3. Schematic of the fabrication process of dual diffuser lithography : (a) spin coating step, (b) exposure step, (c) development step.

매우 낮은 표면조도를 보임으로써 Ground glass 디퓨저에 비해 상대적으로 작은 거칠기를 갖는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 듀얼디퓨저 리소그래피 공정에 사용한 마스크 도안(mask design)을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)는 120 μm 의 길이 20 μm 의 폭을 갖는 직사각형이 20 μm 간격의 평행하게 배열된 어레이 패턴이고, Fig 2(b)는 30 μm 지름을 갖고 20 μm 의 간격의 평행한 배열을 갖는 원 어레이 패턴이다. 빗금으로 표시된 영역은 노광 과정 중 빛을 차단 시켜주는 부분이다.

Fig. 3은 본 연구에서 수행한 공정을 간략히 표현한 공정도이다. 두께 650 μm , 지름 150 mm의 6 inch, p-type (100) Si wafer를 기판으로 사용하였다. Si 기판의 세정을 위해 1 : 2 : 50($\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$)의 부피 비로 조합

한 SC-1(standard clean-1) 용액을 60 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 0.83 MHz의 Megasonic을 이용하여 5 분간 세정한 뒤, DIW (deionized water)로 세척하였다. 이후 기판 위에 패턴을 형성하기 위해 포토리소그래피 공정을 수행하였다. 양성 감광제(positive photoresist)인 AZP4620(AZ-EM, USA)를 회전코팅기(GMS-120, Gensys, Korea)를 이용하여 2000 rpm의 회전속도로 40 초간 스핀코팅하였다. 이후 Soft bake 단계(110 $^{\circ}\text{C}$, 3 min)를 수행하여 3 차원 미세 구조를 구현할 감광층을 형성하였다. 마스크가 장착된 UV aligner(EVG620, EVG, Austria)의 마스크 상단에 듀얼 디퓨저를 설치하였다. 마스크와 디퓨저의 간격은 0을 유지하여, 공기 등의 다른 매질로 인해 빛의 굴절각이 달라질 수 있는 변수를 차단하였다. 이 때, Ground glass 디퓨저를 윗부분에, Opal glass 디퓨저를 아랫부분에 설치한다. 두 디퓨저 간의 간격 역시 0으로 유지하였다. 본 연구에서는 디퓨저 종류에 따른 형성된 3 차원 미세구조의 차이를 확인하기 위해 아랫부분에 설치한 Opal glass 디퓨저는 바꾸지 않고, Ground glass 120, 220의 두 가지 디퓨저를 각각 바꿔가며 감광층 노광에 사용하였다. 노광 공정은 hard contact 방식으로 진행하였으며, broad band (365~436 nm) 의 파장에서 약 580~600 mJ의 에너지로 조사하였다. 입사된 빛은 서로 다른 산란 매커니즘을 갖는 두 장의 디퓨저를 통과하여 Fig. 3(b)와 같이 넓게 산란되어 마스크를 통과한다. 양성감광제를 사용하였기 때문에, 노광부는 현상되고 비노광부의 감광제만 남게 된다. 마지막으로 노광된 시편을 AZ 400K(AZ-EM, USA) 현상액에 4분간 침지(dipping)하여 현상시켰다. 그 결과, Fig. 3(c)와 같은 3 차원 미세 구조를 가지는 패턴이 형성된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 듀얼 디퓨저를 이용한 선형 패턴의 3 차원 미세구조 제작 결과 비교

Fig. 4는 선형 패턴을 이용하여 만든 3 차원 미세 구조의 FE-SEM사진이다. 선형 미세 패턴의 리소그래피 공정 결과 비교를 위하여, 디퓨저 없이 포토리소그래피를 수행한 패턴(Fig. 4(a), (d))과, Ground glass 120과 Opal glass 디퓨저를 이용하여 형성된 패턴(Fig. 4(b), (e)), Ground glass 220과 Opal glass 디퓨저를 이용하여 형성된 패턴(Fig. 4(c), (f))의 surface morphology를 각각 관찰하였다. 먼저 디퓨저의 사용 없이 형성시킨 패턴과 듀얼 디퓨저를 적용한 패턴을 비교하면, 디퓨저 없이 형성된 선형 패턴은 마스크 패턴 형상대로 분명한 직사각형 구조를 가지고 있고 윗면이 평평하며, 패턴과 패턴이 아닌 부분과의 경계가 명확하게 구별되고, 패턴의 측

Fig. 4. FE-SEM images of line pattern : (a) without diffuser, $\times 300$, (b) opal & ground glass 120 diffusers, $\times 300$, (c) opal & ground glass 220 diffusers, $\times 300$, (d) without diffuser, $\times 800$, (e) opal & ground glass 120 diffusers, $\times 800$, (f) opal & ground glass 220 diffusers, $\times 800$.

Fig. 5. 3D-profiler data of line patterns : (a) without diffuser, (b) opal & ground glass 120 diffusers, (c) opal & ground glass 220 diffusers.

면은 수직으로 곧게 형성되었다. 하지만 듀얼디퓨저를 적용한 패턴의 경우, 부드러운 곡선으로 변형된 선형 패턴의 모양을 보이며 윗면이 굴곡지고, 패턴과 패턴이 아닌 부분과의 경계가 불분명하다. 또한 Ground glass 120 디퓨저와 Ground glass 220 디퓨저를 사용한 경우에 따라서 정도의 차이는 있으나 패턴의 측면이 경사진 구조를 가지고 있다. Ground glass 120 디퓨저를 이용한 패턴의 구조와 Ground glass 220 디퓨저를 이용한 패턴의 구조를 비교해 보면, Ground glass 120 디퓨저를 이용한 패턴은 높은 표면조도를 가지는 디퓨저를 이용하였는데, 디퓨저 종류에 따라 차이는 있지만, 표면 조도가 높을수록 빛이 산란되는 각도가 더 작다. 결과적으로 Ground glass 120 디퓨저를 이용한 패턴이 더 날카롭고, 상대적으로 높은 각도의 경사로 기울어져 있는데 비해, Ground glass 220 디퓨저를 이용한 패턴은 더 굴곡진 모

양을 갖고, 패턴의 경사가 더 완만한 것을 확인할 수 있다. 그러나, Fig. 4(c)와 Fig. 4(f)에서와 같이 Ground glass 220 디퓨저와 Opal glass 디퓨저가 조합되어 얻어진 패턴의 경우, 형성된 단차가 매우 낮아 FE-SEM image 만으로는 정확한 morphology 관찰이 어려웠다. 이에 정확한 패턴 관찰을 위해 비접촉식 광학분석장비(non-contact optical profiler)인 3D-profiler 측정을 추가로 실시하였다.

Fig. 5는 위에 언급된 동일한 선형 패턴을 3D-profiler로 측정한 결과를 보여주고 있다. 측정 결과, Fig. 4에서 제시된 FE-SEM의 결과와 비슷하게 디퓨저를 사용하지 않고 포토리소그래피 공정을 진행한 패턴은 매우 수직하게 형성되었고, 듀얼디퓨저를 이용하여 형성된 패턴은 굴곡진 모양으로 형성되었다는 것을 확인할 수 있다. 구체적인 단차 정보를 확인해 본 결과, 디퓨저를 사

Fig. 6. FE-SEM images of circular patterns : (a) without diffuser, $\times 300$, (b) opal & ground glass 120 diffusers, $\times 300$, (c) opal & ground glass 220 diffusers, $\times 300$, (d) without diffuser, $\times 800$, (e) opal & ground glass 120 diffusers, $\times 800$, (f) opal & ground glass 220 diffusers, $\times 800$.

Fig. 7. 3D-profiler data of circular patterns : (a) without diffuser, (b) opal & ground glass 120 diffusers, (c) opal & ground glass 220 diffusers.

용하지 않은 패턴(Fig. 5(a))은 약 $10 \mu\text{m}$ 정도의 단차를 갖는데 비해 Ground glass 120 디퓨저와 Opal glass 디퓨저를 조합하여 진행한 듀얼 디퓨저 공정의 결과(Fig. 5(b))는 약 $3 \mu\text{m}$, Ground glass 220 디퓨저와 Opal glass 디퓨저를 조합하여 진행한 공정의 결과(Fig. 5(c))는 약 $1.5 \mu\text{m}$ 정도의 낮은 단차를 갖는 것을 알 수 있다. 위 결과를 토대로 듀얼 디퓨저 리소그래피 공정을 통해 형성되는 미세 패턴의 높이와 경사도는 조합되는 두 개의 디퓨저의 광학적 특성에 크게 영향을 받는 것으로 사료된다. 또한, 기존에 보고된 디퓨저 리소그래피에 관한 참고문헌에 의하면 노광되는 에너지량(exposure energy)에 따라서도 디퓨저를 통해 최종적으로 감광층에 작용하는 노광 효과는 다른 것으로 보고되어 있는데, 이는 듀얼 디퓨저 리소그래피 공정에서도 동일하게 적용될 것으로

판단되나 본 연구에서는 다루지 못하였고, 차후 노광 에너지량의 차이에 따른 미세 패턴의 변화에 대한 연구가 지속적으로 진행될 계획이다.^{11,12)}

3.2 듀얼 디퓨저를 이용한 원형 패턴의 3 차원 미세구조 제작 결과 비교

Fig. 6은 원형 어레이 패턴을 이용하여 만든 3 차원 미세 구조의 FE-SEM사진이다. 원형 패턴 역시 디퓨저 없이 포토리소그래피를 수행한 패턴(Fig. 6(a))과 Ground glass 120 디퓨저와 Opal glass 디퓨저를 이용하여 형성된 패턴(Fig. 6(b)), Ground glass 220 디퓨저와 Opal glass 디퓨저를 이용하여 형성된 패턴(Fig. 6(c))을 각각 관찰하였다. 패턴의 크기나 구조로 인한 정도의 차이는 있지만, 앞서 언급한 선형 패턴의 특징과 비슷한 경향

을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 원형 패턴을 3D-profiler로 측정한 결과이다. 앞서 선형 패턴의 3-D profiler의 결과와 비슷하게 디퓨저를 사용하지 않은 구조(Fig. 7(a))는 약 10 μm 정도의 단차를 갖는 것을 확인하였고, Ground glass 120 디퓨저와 Opal glass 디퓨저를 조합하여 진행한 듀얼 디퓨저 공정의 결과(Fig. 7(b))는 약 1 μm 정도의 단차를, Ground glass 220 디퓨저와 Opal glass 디퓨저를 조합하여 진행한 듀얼 디퓨저 공정의 결과(Fig. 7(c))는 약 0.5 μm 정도의 단차를 갖는 것을 확인할 수 있다. 원형 어레이 패턴의 경우도 선형 패턴과 마찬가지로, 디퓨저를 사용하지 않았을 경우에 비해 듀얼 디퓨저를 사용했을 경우의 패턴 morphology는 매우 큰 차이를 보였다. 특히 형성된 단차와 측면 경사도를 비교했을 때, 결과적으로 마스크상에 설계된 패턴의 크기가 작아질수록 듀얼 디퓨저를 통과하여 감광층에 노광되는 UV 산란 각도의 영향을 더 많이 받는 것으로 추정된다. 기존의 디퓨저 리소그래피 공정에서는 주로 한 장의 단일 디퓨저를 이용하기 때문에 형성되는 패턴의 미세구조를 제어함에 있어 상당한 어려움이 있었던 것에 반하여, 듀얼 디퓨저 리소그래피 공정에서는 두 장의 서로 다른 산란분포를 보이는 디퓨저를 조합하여 노광함으로써 형성되는 패턴의 모양, 높이(단차), 측면 경사도 등을 제어하는 데에 좀 더 용이하게 해결할 수 있는 가능성을 제시할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 3 차원 미세 구조를 구현하기 위한 방법으로 듀얼 디퓨저 리소그래피 공정을 제안하였다. 듀얼 디퓨저를 구성하기 위해 Ground glass 디퓨저와 Opal glass 디퓨저를 이용하였으며, 각각의 디퓨저는 서로 다른 산란 원리를 가진다. 듀얼 디퓨저는 기존 포토리소그래피 공정과 접목하여 간단한 설치를 통해 수행할 수 있기 때문에 기존의 3 차원 미세구조를 구현하는 공정들의 단점인 단가가 높거나, 복잡한 공정을 수행해야 하는 한계 등을 개선할 수 있다. 또한 동일한 패턴의 마스크를 이용하여도, 디퓨저의 조합을 변화시키는 것만으로 각각 다른 모양과 단차를 가지는 3 차원 미세구조를 구현할 수 있음을 확인하였다. 차후 새로운 광학특성을 갖는 디퓨저를 이용하거나, 다른 모양의 마스크 도안을 이용하여 다양한 3 차원 미세구조를 구현한다면, 연구분야나 산업 현장에서 기존의 기술들을 대체하여 3 차

원 미세구조를 필요로 하는 다양한 종류의 제품 생산에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

Acknowledgment

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIP) (No. 2008-0061891) and 90 % overseas scholarship program HEC (Higher Education Commission) funded by the Government of Pakistan.

References

1. M. Christophersen and B. F. Philips, Appl. Phys. Lett., **92**, 194102 (2008).
2. C. M. Waits, A. Modafe and R. Ghodssi, J. Micromechanic. Microeng., **13**, 170 (2003).
3. S. K. Lee, K. C. Lee and S. S. Lee, J. Micromechanic. Microeng., **12**, 334 (2002).
4. S. Biehl, R. Danzebrink, P. Oliveira and M. A. Aegerter, J. Sol-Gel Sci. Technol., **13**, 177 (1998).
5. S. H. Kim, Y. S. Yang, M. H. Kim, S. W. Nam, K. M. Lee, N. Y. Lee, Y. S. Kim and S. S. Park, Adv. Funct. Mater., **17**, 3493 (2007).
6. J. K. Lee, S. H. Cho, H. B. Kang, H. W. Lim, B. Y. Yoo and J. G. Park, Jpn. J. Appl. Phys., **51**, 026503 (2012).
7. K. Ikuta, S. Maruo and S. Kojima, The Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, Heidelberg, 290 (1998).
8. Z. D. Popovic, R. A. Sprague and G. A. Neville Connell, Appl. Opt., **27**, 1281 (1988).
9. H. Yang, C. K. Chao, C. P. Lin and S. C. Shen, J. Micromechanic. Microeng., **14**, 277 (2004).
10. J. B. Yoon, C. H. Han, E. S. Yoon and C. K. Kim, Jpn. J. Appl. Phys., **37**, 7081 (1998).
11. S. I. Chang and J. B. Yoon, Opt. Express, **12**, 6366 (2004).
12. J. H. Lee, W. S. Choi, K. H. Lee and J. B. Yoon, J. Micromechanic. Microeng., **18**, 125015 (2008).
13. Kang, J. M., Wei, M. K., Lin, H. Y., Lee, J. H., Lin, H. Y., Tsai, J. H. and Wu, T. C., Microelectron. Eng., **87**, 1420 (2010).
14. H. D. Kim, G. W. Yoon, J. H. Yeon, J. H. Lee and J. B. Yoon, J. Micromech. Microeng., **22**, 045002 (2012).
15. H. E. Bennett, J. Opt. Soc. Am., **53**, 1389 (1963).
16. C. L. Mulder, K. Celebi, K. M. Milaninia and M. A. Baldo, Appl. Phys. Lett., **90**, 211109 (2007).